

تهیه و بررسی فرمولاسیون بدنه ولعاب کاشی تک پخت دیواری (Monoporosa)

حمیدرضا رضایی، حسین قصابی، لیلا تقی زاده و حمیدرضا اطلاعاتی

چکیده: رقابت در بازار کاشی همراه با افزایش هزینه‌های تولید، صنعت کاشی را به سوی معرفی فرایندهای تولید کاملاً خودکار از جمله چرخه تک پخت و پخت سریع سوق داده است. دلیل اصلی استفاده زیاد از این نوع کاشیها، سیکل پخت کوتاه آنها (کمتر از ۵۰ دقیقه)، مصرف انرژی پایین و نیز مشخص شدن عیوب آن در مدت زمان کوتاه و سطح بسیار بالای تولید آن است. مخصوصاً کاشی‌های تک پخت متخلخل علاوه بر امتیازات ذکر شده در بالا، این امکان را فراهم می‌کند که دقت بسیار بیشتری بر کنترل ابعاد کاشی صورت بگیرد. هدف از انجام این پروژه بررسی و ساخت بدنه و لعاب کاشی منوپروزا می‌باشد. بر این اساس آزمایش‌های چندی روی بدنه‌های خام و پخته، از جمله: مقاومت خام، خشک و پخت بدنه‌ها، درصد جذب آب و انقباض، بررسی ریزساختاری و فازهای موجود آمده با استفاده از آنالیز اشعه X و میکروسکوپ الکترونی و... انجام شد. نتایج حاکی از تطبیق خواص بدنه‌ها و لعابهای مورد مطالعه با استانداردهای EN می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کاشی، لعاب، منوپروزا، استحکام، تخلخل

۱. مقدمه

- افزایش مقاومت در برابر شوک حرارتی، از طریق کاهش ضریب انبساط حرارتی بدنه و بالا بردن استحکام.
- انتخاب مواد اولیه مناسب که فاقد مواد آلی زیاد باشند.
- کاهش انقباض بدنه و جلوگیری از شیشه‌ای شدن آن از طریق استفاده از اکسیدهای قلیایی خاکی به جای قلیایی‌ها، انجام این کار ثبات ابعادی قطعات را بهبود می‌بخشد. [7]
به دنبال این اهداف در روشها و موادی که قبلاً بکار می‌رفت، تغییراتی داده شد.
در مورد منوپروزا، استفاده از مواد خامی با درجه خلوص بالا و توزیع ریزتر اندازه ذرات ترجیح داده می‌شود.
بطور کلی، بدنه‌های آماده شده برای لعابکاری باید ثبات ابعاد بالایی داشته باشند. تشکیل مینرال‌هایی مانند ولاستونیت، ژلنیت، آنورتیت و داپوپساید، نه تنها ضامن ثبات ابعاد هستند بلکه نشان دهنده تثبیت شرایط دیگر مانند میزان انبساط نهایی، ضریب انبساط و غیره می‌باشند [2].
مواد اولیه مورد استفاده برای کاشیهای منوپروزا، می‌تواند طیف وسیعی از مواد خام را دربرگیرد، چراکه امکان نوشتن فرمول‌های زیادی وجود دارد.
با این حال، تمامی ترکیبات بایستی در یک مسأله اشتراک داشته باشند و آن هم قابلیت ایجاد فازهای کریستالی آلومینو سیلیکات‌های کلسیمی و منیزی می‌باشد.
چراکه انقباض پخت تنها در صورتی می‌تواند نزدیک به صفر برسد که این ترکیبات وجود داشته باشند.

در اصطلاح فنی، منوپروزا به معنای کاشی دیواری لعاب خورده‌ای است که بین دمای ۱۰۵۰ تا ۱۱۸۰ °C پخته شده، جذب آبی بین ۱۳-۱۸٪ داشته، انقباض خطی پس از پخت آن کمتر از ۲٪ بوده و مدول گسیختگی (تست سه نقطه‌ای خمشی) آن کمتر از ۲۰ مگا پاسکال نباشد [1].
در جدول ۱ برخی خواص فیزیکی کاشی‌های دیواری مقایسه شده‌اند.
با توجه به اینکه کوره‌های رولری انعطاف لازم برای سیکل‌های کوتاه را دارا هستند، لذا برای رسیدن به یک محصول بدون عیب با یک سیکل کوتاه، بایستی ترکیب بدنه را تغییر داد و این تغییر در ترکیب بدنه باید در جهات زیر انجام گیرد:

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۹ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۷/۱۵ به تصویب نهایی رسیده است.
دکتر حمیدرضا رضایی، دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، hrezaie@iust.ac.ir
مهندس حسین قصابی، مربی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، hghassai@iust.ac.ir
لیلا تقی زاده، دانش آموزخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران،
حمیدرضا اطلاعاتی، دانش آموزخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

جدول ۱. پارامترهای فنی کاشی‌های متخلخل (گروه BIII) [1]

Product	Water Absorption EN 99 [mass-%]	Modulus of rupture EN 100 [MPa]	(a) $\times 10^{-6}$ EN 103 [K ⁻¹]
Prescribed values	$10 < WA < 20$	> 12	< 9
Monoporosa	۱۳-۱۸	> 20	۷-۷/۵
Cottoforte	۱۶-۱۹	> 15	۶/۵-۷
Majolica	۱۸-۲۴	> 13	۷-۷/۵
Fast - fired tiles	۱۴	۱۸	۶/۸
Slow - fired tiles	۱۶	۱۷	۹/۶

(a) linear coefficient of thermal expansion

ویسکوزیته لعاب در دماهای مختلف به نکات ارزشمندی اشاره کرده است.

افزودن اکسیدهای سدیم، پتاسیم و سرب (به طور مجزا یا همراه باهم) در هر دمایی باعث کاهش شدید ویسکوزیته لعاب می‌گردد. زیر 1000°C مخلوطی با درصد وزنی یکسان از دو اکسید سدیم و پتاسیم حداقل ویسکوزیته را ارائه می‌دهند.

در دماهای بالاتر نیز این دو اکسید رفتاری مشابه داشته اما سرعت کاهش ویسکوزیته لعاب حاوی این دو، کمتر از زمانی خواهد بود که فقط یکی از آنها مورد استفاده قرار گیرد.

در نتیجه با توجه به کشش سطحی کمتر و نقطه ذوب و ویسکوزیته بالاتر اکسید پتاسیم نسبت به دیگری، از اکسید پتاسیم به تنهایی به عنوان دگرگون‌ساز شبکه یا فلاکس استفاده گردید.

افزودن اکسید کلسیم به ترکیب لعاب باعث می‌شود که زیر 700°C ویسکوزیته افزایش یابد، اما با افزایش درجه حرارت و رسیدن به دمای تقریبی 1000°C ویسکوزیته به طور ناگهانی کاهش می‌یابد.

اکسید منیزیم در هر دما و با هر نسبتی باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود، اما سرعت تغییرات در چنین حالتی کمتر از اکسید کلسیم خواهد بود. اکسید روی تا دمای تقریبی 600°C ویسکوزیته را به آرامی افزایش می‌دهد، اما باعث می‌گردد که در 900°C ویسکوزیته کاهش یابد. روند تغییرات ویسکوزیته اکسید بور در رابطه با تغییرات دما شبیه به اکسید روی می‌باشد بدین ترتیب که در دماهای پایین سبب افزایش کند ویسکوزیته شده و بعد از آن یعنی در دمای تقریبی 700°C ویسکوزیته به کندی کاهش می‌یابد. اما نباید فراموش کرد که اولاً اکسید بور از فراریت بالایی برخوردار است که با توجه به بالاتر بودن دمای پخت در سیستم تک پخت سریع، احتمال تصعید شدن آن از لعاب و در نتیجه بروز عوارض بعدی وجود دارد. ثانیاً اصلی‌ترین گدازآور بوده و دمای نرم شوندگی لعاب را شدیداً کاهش می‌دهد که این اثر برای سیستم تک پخت بسیار مضر است. استفاده از اکسید سرب نیز به دلیل کاهش نقطه نرم شوندگی لعاب و قابلیت تصعید بالای آن چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. سیلیس، اکسید زیرکونیم و

۱-۱. ویژگیهای لعابهای منوپروزا

رفتار پخت این لعابها با لعابهایی که معمولاً در پخت مضاعف استفاده می‌شوند، متفاوت است. رفتار متفاوت آنها نتیجه برخی تغییرات ترکیبی نظیر افزایش اکسیدهای قلیایی خاکی (عمدتاً CaO و ZnO) و کاهش مقدار اکسیدهای قلیایی و اکسید بور می‌باشد [4]. این تغییر در ترکیب به دو دلیل انجام می‌شود:

الف) مدت زمان بسیار کوتاه پخت و ب) استفاده از بدنه خام به جای بدنه پخته شده. لعابهای مناسب برای این تکنولوژی که سیکل پخت ۵۰-۳۰ دقیقه‌ای دارند، به زمان بسیار کوتاهی (۲-۴ دقیقه) برای شیشه‌ای شدن نیاز دارند. بنابراین نقطه نرم‌شوندگی این فریت‌ها در دماهای متوسط بوده و ویسکوزیته پایینی در ماکزیمم دمای پخت (1100°C - 1050°C) دارند. همچنین ترکیب لعاب طوری انتخاب می‌شود که از ضریب انبساط حرارتی مساوی و یا کمتر از بدنه برخوردار باشد، همانطور که بدنه نیز باید دارای حداقل ضریب انبساط حرارتی ممکن باشد و نیز در روش تک پخت سریع می‌بایست قابلیت واکنش لعاب با بدنه زیاد و به عبارتی لایه بافر (buffer) ایجاد شده تا حد امکان ضخیم باشد. همچنین لعاب می‌بایست از کشش سطحی پایینی برخوردار باشد تا قابلیت پوشش عیوب ایجاد شده هنگام لعاب زنی و یا مراحل اولیه پخت را در مدت زمانی کوتاه داشته باشد.

در انتخاب ترکیب فریت‌ها به مسائل مختلفی از جمله: ویسکوزیته، دمای نرم شوندگی، اسیته، ماتی و... توجه گردید که در زیر به اختصار بررسی شده‌اند.

الف) در تک پخت سریع می‌بایست دمای نرم شوندگی لعاب تا حد امکان بالا برده شود. به عبارت دیگر جهت خروج گازهای ناشی از واکنش‌ها می‌بایست تأخیر در زینتر شدن ذرات را بوجود آورد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اگر از موادی استفاده شود که در کنار بالا بردن دمای نرم شوندگی لعاب، دارای این قابلیت باشند که پس از گذر از نقطه نرم شوندگی ویسکوزیته را سریعاً کاهش دهند، به هدف ساخت فریت مناسب نائل خواهیم آمد. آشنایی با نقش اکسیدهای مختلف بر ویسکوزیته لعاب در ارتباط با درجه حرارت، در رسیدن به این هدف به ما کمک می‌نماید. Parmelee [6] در مورد اثر اکسیدهای مختلف بر

ساخت شرکت SACMI شکل‌دهی صورت گرفت. ابعاد قالب $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ ، فشار اولیه 100bar و فشار ثانویه 300bar بود. پس از پرس، نمونه‌های تهیه شده، از لحاظ انبساط پس از پرس و استحکام خام آزمایش شدند.

۴-۲. خشک کردن

نمونه‌ها پس از پرس در یک خشک‌کن آزمایشگاهی (VIADINI) خشک شدند. سیکل خشک شدن بدین ترتیب بود که ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه در دمای اولیه 40°C نگهداری شده و سپس هر ۱۵ دقیقه یکبار 10°C به دمای خشک‌کن افزوده شده و در نهایت به مدت دو ساعت در دمای 120°C نگهداری شدند. بعد از خشک شدن، طول خشک نیز اندازه‌گیری گردید.

۵-۲. آماده سازی لعاب و لعاب زنی

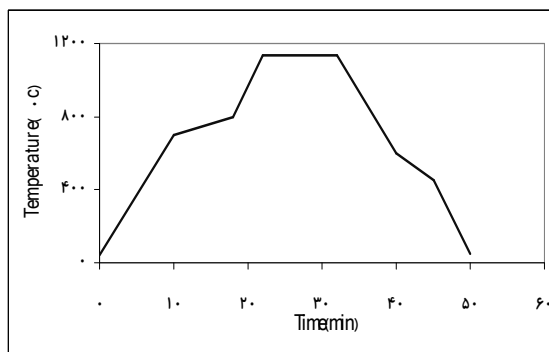
با توجه به قسمت تئوری پروژه، تعداد ۴ فریت در آزمایشگاه بصورت زیر آماده گردید. ابتدا مواد اولیه پس از محاسبه فرمولاسیون فریته‌ها توسط دستگاه فست میل مخلوط شده و سپس در یک کوره الکتریکی در دمای 1300°C ذوب و سپس در آب سرد شدند. فریت T1 را بر اساس کارهای انجام شده توسط محققین [4-5] به عنوان پایه در نظر گرفته و سپس مقادیر اکسیدهای MgO ، CaO و ZnO در سه فریت دیگر تغییر داده شد.

مشخصات و فرمول زگر فریته‌ها در جدول‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ آمده است. ضریب انبساط حرارتی لعاب‌ها بصورت محاسباتی در جدول ۱۰ آمده است.

۶-۲. پخت

نمونه‌های آماده شده بدون لعاب برای انجام تستهای مربوط به بدنه و بقیه آنها بصورت لعابدار پخته شدند. برای پخت نمونه‌ها از کوره رولری ساخت شرکت SACMI، به طول ۶۰ متر استفاده شد. منحنی پخت کاشیها در شکل ۱ آورده شده است.

بعد از پخت در کوره، انقباض کل، استحکام خمشی پخت، جذب آب و در نهایت درصد پرت نهایی بدنه‌ها مشخص گردید (جدول ۱۱).



شکل ۱. منحنی پخت نمونه‌ها در کوره

آلومینا نقش مشابهی داشته و در هر دمایی باعث افزایش ویسکوزیته می‌شوند. [6]

ب) در حال حاضر در دنیا جهت اپک نمودن لعابهای پایه از سیلیکات زیرکونیم بجای اکسید قلع و یا دیگر اپک کننده‌ها استفاده می‌گردد. در یک لعاب سفید زیرکون دار، حین فرایند پخت، اکسید زیرکونیم به صورت یکنواخت در سطح توزیع شده و ضریب انکسار ثابتی تولید می‌نماید. زیرکونیم در فاز شیشه‌ای لعاب نظیر یک واسطه عمل می‌نماید، به عبارت دیگر یون‌های آزاد موجود در فریت، در تماس با زیرکون ترمیم گشته و ایجاد یک اسکلت مولکولی از نظر سطح انرژی در پایین‌ترین وضعیت خود قرار گرفته لذا کریستال‌های تولید شده کاملاً باثبات و مقاوم می‌باشند، علاوه بر موارد فوق، استفاده از زیرکون، عیوب سطحی قطعات از جمله سوراخهای سوزنی را به حداقل مقدار می‌رساند [4-5]. اکسیدهای کلسیم، منیزیم و روی نیز اپاسیفایرهای هستند که به اکسید زیرکونیم در این امر کمک می‌کنند.

۲. روش تحقیق و نتایج

۱-۲. انتخاب مواد خام

آنالیز شیمیایی (جدول ۲) و تستهای انجام شده روی مواد اولیه مصرفی از قبیل تعیین پلاستیسیته و درصد آب کارپذیری، روانسازی، درصد افت وزنی در 1050°C ، استحکام و انقباض خام، انقباض پخت در جدول ۳ آمده است. ترکیب بدنه‌های تشکیل شده از این خاک‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

۲-۲. آماده سازی گرانول

برای آماده سازی گرانول، ابتدا مواد خام پس از کوبش از الک ۶۰ مش عبور داده شده و پس از توزین مخلوط شدند. سپس در جارمیل به روش تر سایش داده شدند. درصد آب افزوده شده به مخلوط از ۳۶ الی ۴۵ درصد بر مبنای خشک متغیر بود. زمان سایش حدود دو الی دو و نیم ساعت و حداکثر روانساز اضافه شده به دوغاب‌ها ماکزیمم ۱/۵ درصد T.P.P می‌باشد. در این قسمت دانسیته، ویسکوزیته و مانده روی الک دوغاب تعیین شد. پس از تهیه دوغاب، دوغاب به خوبی مخلوط گردید و رطوبت آن به ۱۵-۱۰٪ بر مبنای خشک رسانده شد، آنگاه بصورت فتیله‌هایی از الک ۶۰ مش رنده شده و بصورت گرانول درآمد. سپس یک تست رطوبت روی پودر انجام گرفت. اگر رطوبت پودر برای مرحله پرس حدود ۶-۵٪ بر مبنای تر بود، به مدت ۲۴ ساعت در نایلون‌های پلاستیکی در بسته نگهداری شده تا به یکنواختی کامل برسند.

۳-۲. پرس

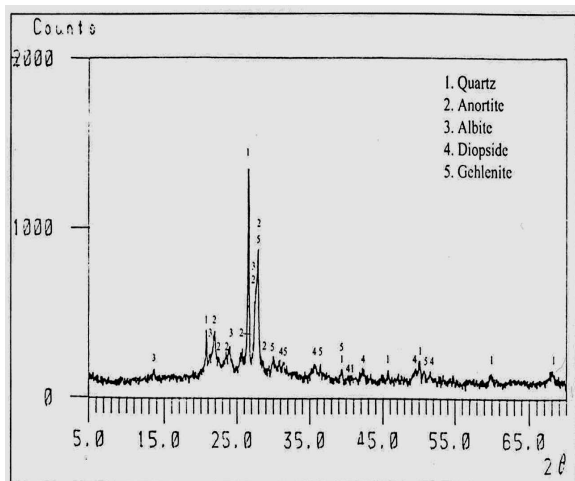
پس از آماده‌سازی گرانول با درصد رطوبت مطلوب با استفاده از پرس آزمایشگاهی دو ضربه‌ای با فشار ماکزیمم 400bar

۷-۲. آنالیز اشعه X

برای شناسایی فازهای کریستالی بوجود آمده در بدنه کاشی‌ها از دستگاه X-Ray Diffraction مدل PW 1840 ساخت شرکت Philips هلند استفاده شد. فازهای اصلی شناسایی شده توسط XRD شامل کوارتز، آنورتیت، آلپیت، ژلنیت و دایوپساید بودند که منحنی XRD تعدادی از آنها در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ آورده شده است.

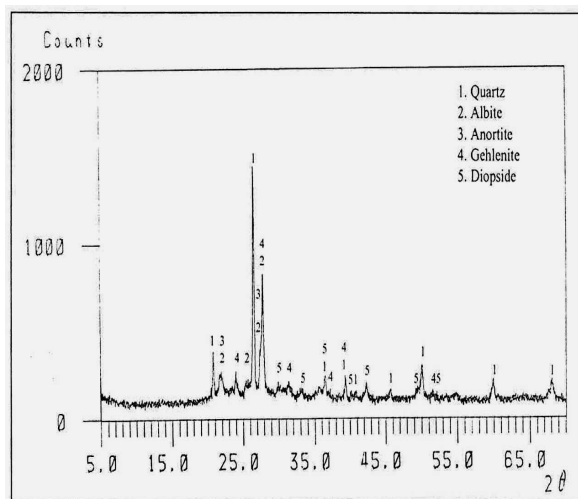
۸-۲. مطالعه ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی

برای بررسی بیشتر روی فازهای مشاهده شده از آنالیز XRD بدنه‌ها، بررسی ریزساختاری روی بدنه‌های فوق توسط میکروسکوپ الکترونی صورت گرفت. در تصاویر بدست آمده ذرات گوشه‌دار کوارتز، ذرات حاوی عناصر Si، Al، Ca و به چشم می‌خورد.

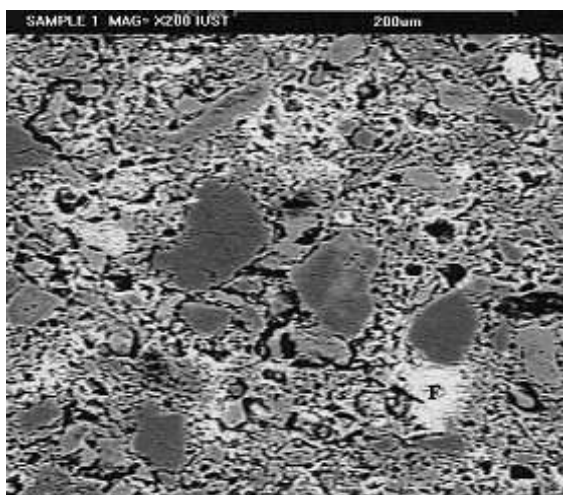


شکل ۴. آنالیز فازی بدنه ۴

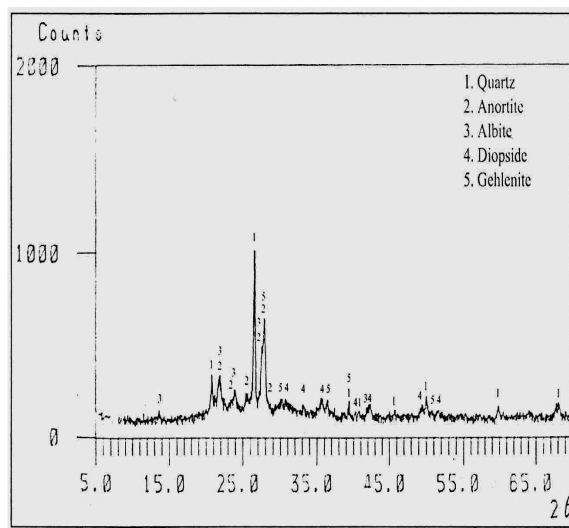
با مشاهده توزیع ذرات در تصاویر بدست آمده، هموزنیته و یکنواختی ساختارهای حاصل نتیجه می‌شود. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ تعدادی از تصاویر ریز ساختاری بدنه‌ها مشاهده میشوند (کوارتز = Q اکسید آهن = F).



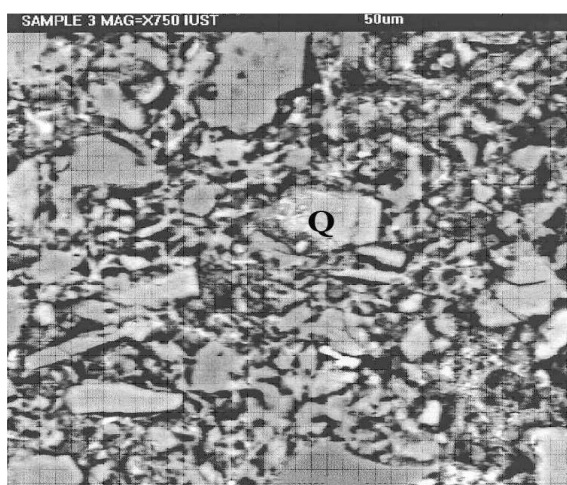
شکل ۲. آنالیز فازی بدنه ۱



شکل ۵. ریزساختار بدنه ۱ (X200)



شکل ۳. آنالیز فازی بدنه ۳



شکل ۶. ریزساختار بدنه ۳ (X200)

جدول ۲. آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی

مواد اولیه	L.O.I.	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
کائولن دیاموند	۱۱/۱	۱/۴	۲/۶	۱/۳۵	۱/۱۲	۱/۰۷	۱/۷	۳۶/۱	۴۸/۸
کائولن قره آغاج	۶/۸	۱/۴۳	۱/۴۲	۱/۷	۲/۱	-	۳/۵	۳۲/۶	۴۵/۹
کائولن باغسیاه	۱۰/۹	-	۱/۴	-	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۲۵/۴	۶۲/۶
بالکلی طبس	۹	۱	۱	-	۱/۵	۱	۱/۵	۲۲	۶۴
بالکلی آباده	۷/۰۶	۱/۸۶	۱/۴	۱/۲	۱/۳۱	۱	۱	۲۸/۰۹	۵۱/۹
بنتونیت دماوند	۷/۵۸	۱/۲۹	۱/۹۹	۱/۴۱	۵/۳۱	۱/۲۵	۱/۵۵	۱۱/۸۳	۶۹/۲۳
دولومیت	۲۶/۸	-	-	۲۰/۴	۳۲	-	۱/۰۴	-	۱/۷۴
کربنات کلسیم	۴۴	-	-	-	۵۶	-	-	-	-
سیلیس	۱/۷۵	۱/۰۸	۱/۱۵	۱/۰۱	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۸	۱/۷۸	۹۸
فلدسپار چغایی	۱/۶۶	۳/۸۸	۵/۶	-	۱/۸۱	۱/۰۳	۱/۲۸	۱۴/۶	۷۴
فلدسپار بروجرد	۱/۸۱	۸/۱۹	۵/۴	۱/۳۶	۳/۱۴	۱/۴۳	۱/۱۵	۱۹/۵	۶۶/۴
فلدسپار سدیک	۳/۵	۸/۸۸	۱/۰۵	۱/۰۶	۴/۴۵	۱/۵۹	۱/۱۹	۶۶/۹۵	۱۵/۶۱
فلدسپار پتاسیک	۱/۸۲	۳/۰۱	۱۱/۵۱	۱/۱	۱/۴۵	-	۱/۰۵	۶۶/۷۷	۱۸/۳۹

جدول ۳. نتایج بدست آمده از بررسی رسهای ایرانی

مواد اولیه	خواص	افت وزنی در ۱۰۵۰°C (%)	درصد آب کارپذیری (ففر کورن)	عدد پلاستیسیته (ففر کورن)	استحکام خمشی خام (N/mm ²)	انقباض خام (%)	انقباض پخت (%)
کائولن قره آغاج	۷/۱۰	۳۳	۳۴/۲	۱/۳۸	۴/۷	۱/۴	
کائولن باغسیاه	۱۰/۵	۳۸	۴۱/۷	۱/۴۵	۵/۳	۱/۸۶	
بالکلی طبس	۸/۸	۳۰	۳۳/۵	۱/۴۲	۶/۵	۷/۸	
بالکلی آباده	۶/۹	۴۰/۸	۴۴	۱/۴۸	۶/۳	۲/۹	

جدول ۴. فرمولاسیون بدنه‌های کاشی منوپروزا

ترکیب مواد اولیه	بج ۱ (wt%)	بج ۲ (wt%)	بج ۳ (wt%)	بج ۴ (wt%)	بج ۵ (wt%)	بج ۶ (wt%)
کائولن قره آغاج	۲۰	۲۰	۲۸	۲۰	۲۰	۲۰
کائولن باغسیاه	۲۰	۱۵	-	-	۱۵	۱۵
بالکلی طبس	۲۰	۲۰	۱۵	-	۵	۱۵
بالکلی آباده	۱۰	۱۰	۲۰	۴۰	۲۵	۱۵
بنتونیت دماوند	۵	۵	۷	۷	۷	۷
کربنات کلسیم	۱۰	۷	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰
سیلیس همدان	-	۱۰	-	۵	-	-
فلدسپار چغایی	-	۸	۲۰	۱۶	۱۴	۱۴
فلدسپار بروجرد	-	۵	-	-	-	-
فلدسپار سدیک	۵	-	-	-	۴	۴
فلدسپار پتاسیک	۱۰	-	-	-	-	-

جدول ۵. نتایج قبل از پخت بدنه‌ها

بدنه ۶	بدنه ۵	بدنه ۴	بدنه ۳	بدنه ۲	بدنه ۱	
۴۰/۲	۳۹/۸	۳۷/۰۴	۳۶/۰۵	۴۰/۷	۴۳/۳	درصد رطوبت بر مبنای خشک دوغاب
.	مانده روی الک ۱۰۰ مش (%)
۱/۴۶	۱/۴	۱/۶۸	۱/۵	۳/۱	۳/۸	مانده روی الک ۲۳۰ مش (%)
۵/۳	۵/۵	۶/۲	۵/۲۲	۶/۹	۶/۸	رطوبت گرانول (%)
۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۳۷	انقباض پس از پرس (%)
۹/۶	۱۰/۷	۷/۹۴	۱۱/۵۳	۸/۴۷	۱۰/۲	مقاومت خمشی خام (kg/cm ²)
۴۷/۲	۴۹/۰۸	۵۱/۸۲	۴۴/۸۸	۳۳/۵۶	۵۲/۵۳	مقاومت خمشی خشک (kg/cm ²)

جدول ۶. فرمول زگر لعاب T1

K ₂ O	۰/۱۶۲	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	۰/۱۷۳ ۰/۰۰۴	SiO ₂	۲/۱۳۸
ZnO	۰/۲۲۴			B ₂ O ₃	۰/۲۱۸
Na ₂ O	۰/۰۰۸			ZrO ₂	۰/۲۹۶
CaO	۰/۴۲۱			TiO ₂	۰/۰۰۲
MgO	۰/۱۸۴				

جدول ۷. فرمول زگر لعاب T2

K ₂ O	۰/۱۶۲	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	۰/۱۷۳ ۰/۰۰۴	SiO ₂	۲/۱۳۸
ZnO	۰/۲۲۴			B ₂ O ₃	۰/۲۱۸
Na ₂ O	۰/۰۰۸			ZrO ₂	۰/۲۹۶
CaO	۰/۶۰۵			TiO ₂	۰/۰۰۲

جدول ۸. فرمول زگر لعاب T3

K ₂ O	۰/۱۶۲	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	۰/۱۷۳ ۰/۰۰۴	SiO ₂	۲/۱۳۸
ZnO	۰/۳۲۴			B ₂ O ₃	۰/۲۱۸
Na ₂ O	۰/۰۰۸			ZrO ₂	۰/۲۹۶
CaO	۰/۳۲۱			TiO ₂	۰/۰۰۲
MgO	۰/۱۸۴				

جدول ۹. فرمول زگر لعاب T4

K ₂ O	۰/۱۶۲	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	۰/۱۷۳ ۰/۰۰۴	SiO ₂	۲/۱۳۸
ZnO	۰/۲۲۴			B ₂ O ₃	۲/۲۱۸
Na ₂ O	۰/۰۰۸			ZrO ₂	۲/۲۹۶
CaO	۰/۳۰۲			TiO ₂	۰/۰۰۲
MgO	۰/۳۰۳				

جدول ۱۰. ضریب انقباض حرارتی لعابها

T4	T3	T2	T1	فریت
$۸/۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۵۱ \times ۱۰^{-۶}$	ضریب انقباض حرارتی

جدول ۱۱. نتایج پس از پخت کاشیها

رنگ بدنه	انقباض کل (%)	جذب آب (%)	مقاومت خمشی پخت (kg/cm ²)	پرت نهایی (%)	
طوسی با نقاط تیره	۰/۶۹	۱۶/۰۴	۱۹۳/۷۳	۱۵/۴۲	بدنه ۱
طوسی	۰/۹۴	۱۲/۵۹	۱۷۳/۵۸	۱۱/۸۱	بدنه ۲
ماشی	۱/۰۳	۱۶/۶۲	۲۰۹/۹۳	۱۴/۱۵	بدنه ۳
کرم روشن باخالهای ریزرنگی	۰/۲۲	۱۶/۹۳	۱۹۲/۴۷	۱۴/۰۸	بدنه ۴
ماشی	۰/۷	۱۶/۵۰	۲۰۳	۱۴/۶۷	بدنه ۵
طوسی روشن	۰/۷	۱۶/۸۱	۲۰۵	۱۴/۹۵	بدنه ۶

- از آنجاکه انبساط معمولی بعد از پرس از نظر صنعتی حدود ۰/۵-۰/۸ درصد می‌باشد، تمامی بدنه‌های موجود مقدار کمتری از این محدوده را نشان دادند.

۲-۳. بررسی آنالیز اشعه X

همانطور که در نمودارهای اشعه X ملاحظه می‌شود، ورود کلسیت و ترکیبات کلسیم و منیزیم دار به فرمولاسیون بدنه، باعث تشکیل مینرال‌های کلسیم و منیزیم دار و بوجود آمدن فازهای کوارتز، آنورتیت، آلبیت، ژلنیت و دایوپساید در سیکل پخت سریع شده است. تحقیقات نشان داده‌اند که تشکیل این مینرال‌های جدید در کاهش انبساط رطوبتی و افزایش مقاومت مکانیکی مؤثرند [3]. همچنین تاکید بر این نکته مهم است که انقباض پخت تنها در صورتی می‌تواند نزدیک به صفر برسد که آلومینو سیلیکاتهای کلسیمی و منیزیمی وجود داشته باشند [2].

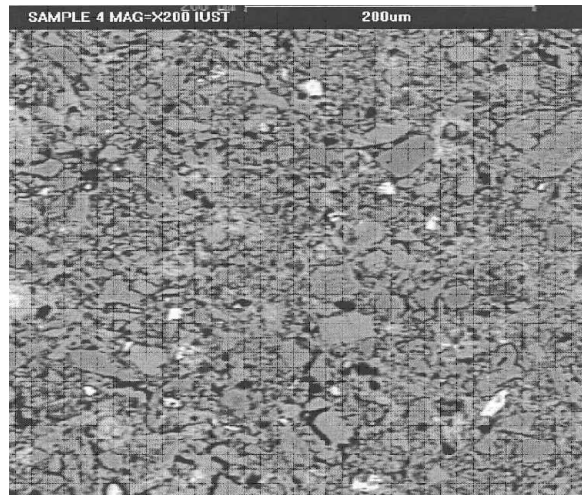
۳-۳. نتایج بدست آمده پس از اعمال لعاب

با اعمال ۴ لعاب تهیه شده بر بدنه‌ها، نتایج زیر مشاهده شد: لعاب ۱ دارای کیفیت خوبی از نظر سطح ظاهری است و تنها مقدار کمی پین هول بر روی سطح آن مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

- ۱- ریز دانه بودن مواد اولیه دوغاب لعاب
 - ۲- نزدیک بودن دمای تجزیه مواد و نقطه نرم شوندگی لعاب
 - ۳- زیاد بودن ویسکوزیته و کشش سطحی لعاب
- برای رفع این عیوب می‌توان:
- ۱- نقطه نرم شوندگی لعاب را بالا برد
 - ۲- در صورت تحمل بدنه دما یا زمان پخت را افزایش داد
 - ۳- از انگوب استفاده کرد
 - ۴- ضخامت لعاب را کاهش داد
 - ۵- دانه بندی مواد اولیه لعاب را تغییر داد.
- در لعابهای ۲، ۳ و ۴ پین هول دیده نشد که شاید به دلیل بالا رفتن دمای نرم شوندگی لعاب در اثر تغییر اکسیدهای کلسیم، منیزیم و روی بوده است. در لعاب ۲ اکسید منیزیم را حذف کرده و از اکسید کلسیم بیشتری در ترکیب استفاده شده است. این لعاب کیفیت خوبی داشته و تنها کمی ناهماهنگی در سطح به دلیل بالا بودن ویسکوزیته و کشش سطحی لعاب موجود می‌باشد که می‌توان با جایجا کردن دمای پخت آنرا رفع کرد. استفاده بیشتر از قلیایی‌ها به دلیل پایین آوردن نقطه نرم شوندگی توصیه نمی‌شود [6].

در لعاب ۳ جمع شدگی سطح لعاب دیده می‌شود که به دلایل زیر است:

- ۱- انقباض خشک زیاد دوغاب (سطح مخصوص زیاد مواد) لعاب



شکل ۷. ریز ساختار بدنه ۴ (X200)

۳. تحلیل نتایج

۳-۱. مقایسه خواص بدنه‌ها با استانداردهای کاشی منوپروزا

- شش بدنه ذکر شده همگی از استحکام خمشی خام و خشک مناسبی برخوردار بودند. از آنجاکه استحکام خمشی خشک منوپروزا برای اعمال لعاب بسیار ضروری و مهم است، ملاحظه شد که هر شش بدنه در شرایط استاندارد یعنی استحکام خمشی خامی بالاتر از ۲۵ bar، قرار دارند که برای انتقال کاشی و نیز اعمال لعاب کاملاً مناسب می‌باشند.

- استحکام خمشی پخت نیز طبق استاندارد اروپایی کاشی EN 100 همگی در محدوده استاندارد قرار دارند.

- طبق استاندارد EN 99 از نظر میزان جذب آب نیز تمامی بدنه‌ها، بجز بدنه ۲، از جذب آب مناسبی بین ۱۶-۱۷٪ برخوردار بودند. اما بدنه ۲ میزان جذب آب کمتری را نسبت به استاندارد که حداقل آن ۱۳٪ می‌باشد نشان داد. پایین بودن جذب آب در بدنه ۲ را می‌توان به دو علت نسبت داد. یکی مقدار زیاد بالکلی طیس که به سبب وجود ناخالصی‌های Fe و Ti باعث انقباض زیاد بدنه شده است و دیگری پایین بودن مقدار کربنات کلسیم می‌باشد.

- از نظر درصد انقباض کل بدنه‌های ۲ و ۳ میزان انقباض زیادی از خود نشان دادند که این مسأله ممکن است باعث بروز عیوبی هنگام خشک و پخت نظیر بالا رفتن تولرانس ابعاد و ... شود. ولی انقباض بقیه بدنه‌ها مناسب می‌باشد. بدنه ۴ کمترین میزان انقباض را بین ۶ بدنه دارد. در این بدنه بالکلی طیس که درصد انقباض بالایی دارد، وجود ندارد. ضمن اینکه ۵٪ کوارتز نیز باعث کنترل نسبی انقباض می‌شود. همچنین اکسیدهای کلسیم و منیزیم که نقش کنترل کننده ابعاد را دارند بیشترین مقدار را بدنه ۴ دارد. مجموعه این عوامل باعث شده‌اند تا این بدنه کمترین انقباض را داشته باشد. بدنه ۳ که بیشترین انقباض را دارد، از مقدار بیشتری فلدسپار و بالکلی برخوردار است.

همچنین بررسی ریز ساختاری بدنه نشان دهنده وجود توزیع همگن دانه‌های گوشه دار کوارتز، ذرات سفید اکسید آهن و زمینه‌ای از ذرات حاوی عناصر Si, Al, Ca و... می‌باشد.

مراجع

- [1] Manfredini, T., and M. Romagnoli, "Iron and calcite-rich ceramic bodies for porouse tiles manufacturing by fast double-firing", *Interceram*, 48, No. 3, 1999.
- [2] Biffi, G., "Technology for the production of porouse single fired ceramic wall tile", *Industerial ceramics* 9, 1989.
- [3] Eftekhary, B., and Alizadeh, P., "Effect of carbonates on wall tile bodies", *Am. Ceram. Soc. Bull.* 75, 1996.
- [4] Amoros, J. L., Escardino, A., M.J. Orts, and A. Moreno, "Zirconium glazes used in fast single fired wall tile manufacture, part 1. Crystallisation mechanism", *British Ceram. Trans.* 93 [6] 1994.
- [5] Amoros, J.L., Escardino, A., M.J. Orts, and A. Barba, "Zirconium glazes used in fast single fired wall tile manufacture, part 2. Empirical model for fitting experimental data from devitrification process", *British Ceram. Trans.* 99, 2000.
- [6] Cullen W., Parmelee. "Ceramic glazes". The Maple Press Company. New York, Pennsylvania. U.S.A. 1973.
- [7] Sacmi Handbook, "From technology through machinery to kilns for sacmi tile", Vol. 1 Products, Sacmi Imola, Italy 1986.

۲- ویسکوزیته و کشش سطحی زیاد لعاب هنگام پخت که به علت بالا بودن مقدار ZnO می‌باشد.

۳- انقباض زیاد لعاب هنگام پخت [6]

برای رفع این عیب می‌توان در صورت تحمل بدنه دما یا زمان پخت را افزایش داد یا ضخامت لعاب را کاهش داد و یا دانه بندی دوغاب لعاب را کنترل کرد.

همچنین در این لعاب اِپسِیته بیشتر از لعاب ۱ است که به دلیل افزایش ZnO نسبت به فریت ۱ می‌باشد. در لعاب ۴ جمع شدگی و خزیدگی با شدت بیشتری مشاهده می‌شود که بدلیل افزایش MgO بوده است چرا که MgO و Al_2O_3 به علت کشش سطحی بالا خطر خزش را افزایش می‌دهد. خواص CaO نیز مشابه با MgO می‌باشد ولی دیرگدازی و کشش سطحی MgO بیشتر است. بنابراین استفاده بیشتر از CaO نسبت به MgO منطقی تر می‌باشد [6].

در تمامی لعاب‌های بدنه ۴ ترک‌های ریز مشاهده شد. چون این عیب در لعاب سایر بدنه‌ها مشاهده نشد بنابراین بروز عیب مربوط به بدنه ۴ بوده و لعاب‌ها در آن دخیل نمی‌باشند. این عیب می‌تواند ناشی از کوچکتر بودن ضریب انبساط حرارتی بدنه ۴ نسبت به ضریب انبساط حرارتی لعاب‌ها دانست که باعث ایجاد تنش کششی در لعاب‌های اعمال شده و بروز ترک در سطح آنها می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مواد اولیه ایرانی به منظور رسیدن به فرمولاسیون مناسب برای بدنه و لعاب کاشی تک پخت دیواری، ۶ ترکیب برای بدنه و ۴ ترکیب برای لعاب تهیه شد. پس از انجام آزمایشات مربوطه، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- تنظیم صحیح مواد اولیه باعث بدست آمدن استحکام خام و نیز استحکام پخت کاملاً مناسب گردید. همچنین در تمامی بدنه‌ها انبساط بعد از پرس در محدوده استاندارد قرار دارد.

۲- استفاده زیاد از بالکلی طبس و نیز مقدار کم کربنات کلسیم باعث جذب آب پایین بدنه ۲ شده است. در صورتی که بقیه بدنه‌ها کاملاً در محدوده استاندارد قرار دارند.

۳- درصد انقباض کل بدنه‌های ۲ و ۳ بیشتر از حد استاندارد بود که باعث بروز عیوب در هنگام پخت گردید. بقیه بدنه‌ها در محدوده استاندارد قرار داشتند.

۴- آنالیز اشعه X نشان می‌دهد که در بدنه‌ها فازهای کوارتز، آنورتیت، آلبیت، ژلنیت و دایوپساید تشکیل شده‌اند. تشکیل این مینرال‌ها باعث افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش انبساط رطوبتی می‌شود.